

PANORAMAS SETORIAIS

Mudanças climáticas

SIDERURGIA

Pedro Sergio Landim de Carvalho

Pedro Paulo Dias Mesquita

Luciane Melo*

* Respectivamente, gerente e economista do Departamento de Indústria de Base da Área de Insumos Básicos do BNDES e gerente do Departamento de Pesquisas e Operações da Área de Pesquisa e Acompanhamento Econômico do BNDES.

Introdução

A siderurgia é responsável por cerca de 6,5% das emissões totais e aproximadamente 1/3 das emissões industriais de carbono no nível mundial (PAULA, 2012). Do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE) do setor, mais de 80% são resultantes do consumo de insumos energéticos (CARVALHO *et al.*, 2015). A produção de aço e ferro-gusa respondeu por 6,2% do total de energia consumida no Brasil em 2014 (EPE, 2015) e 43% das emissões de GEE nos processos industriais no Brasil em 2012 (BRASIL, 2014).¹ O gás carbônico (CO₂) corresponde a mais de 90% dos GEE emitidos na siderurgia. Além dos GEE, a siderurgia emite gases que provocam a chuva ácida e material particulado.

De modo geral, as indústrias siderúrgicas podem ser classificadas em dois tipos de acordo com sua estrutura de produção: as usinas integradas e as semi-integradas. Nas usinas integradas, as atividades de transformação do minério de ferro e de produção do aço são realizadas na mesma unidade industrial. A produção em usinas integradas é composta de três etapas (CARVALHO *et al.*, 2015): a redução (produção de ferro); o refino (produção e resfriamento do aço); e a laminação (conformação mecânica dos produtos siderúrgicos destinados à comercialização).

As usinas semi-integradas não incorporam a etapa de redução e são alimentadas principalmente com sucata ferrosa, mas também com ferro-gusa. No Brasil, há ainda os produtores independentes de ferro-gusa ("guseiros"), que utilizam, majoritariamente, fornos à base de carvão vegetal.

Na rota integrada a coque, responsável por 74% da produção de aço em termos mundiais (CARVALHO *et al.*, 2015), o carvão mineral é a principal fonte de energia térmica, servindo também como agente redutor do minério de ferro. O processo de produção de ferro-gusa utiliza o carvão mineral, transformado em coque, como fonte de energia e de carbono para a transformação do minério de ferro no alto-forno (PAULA, 2012). No Brasil há ainda usinas integradas com fornos que utilizam carvão vegetal como agente termorredutor. A produção de aço com carvão vegetal em substituição ao coque é considerada um importante meio para redução de emissões no setor siderúrgico (BRASIL, 2010).

Nas usinas integradas a coque, a etapa de redução é responsável por 80-85% do consumo de energia, e portanto, concentra as principais oportunidades de mitigação de emissões e eficiência energética (PAULA, 2012).

A etapa de produção e refino do aço, embora não seja intensiva em consumo energético, é relevante do ponto de vista de emissões que são geradas pela necessária

¹ As emissões de GEE no processo industrial da siderurgia incluem as emissões referentes ao consumo de insumos energéticos na etapa de redução (BRASIL, 2014).

diminuição do nível de carbono contido no ferro-gusa. Nessa fase, o oxigênio soprado reage com o ferro-gusa líquido, provocando a emissão de monóxido de carbono (CO) e de gás carbônico (CO₂).

As usinas semi-integradas utilizam, principalmente, sucata ferrosa para a produção e o refino de aço líquido. A utilização de sucata permite não apenas reduzir o consumo de energia como também as emissões geradas na etapa de redução (produção do ferro-gusa). Nessas usinas, a carga (composição de sucata e ferro-gusa) é fundida a temperaturas elevadas, com o uso intensivo de energia elétrica em fornos elétricos a arco (EAF). Nas usinas semi-integradas, essa etapa, de acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), responde por 70-75% da energia total consumida (CGEE, 2010). Como trata-se de energia elétrica, as emissões são indiretas e dependem da matriz energética do país. A ampliação da participação de fontes renováveis para geração de energia elétrica, portanto, reduz as emissões de gases de efeito estufa na rota semi-integrada.

A indústria brasileira possui resultados que, comparados à média mundial, demonstram uma situação favorável em relação aos indicadores de consumo de energia, emissões de GEE e eficiência no uso de materiais, como pode ser comprovado pela Tabela 1 a seguir. Especialistas e representantes de diversas empresas do setor siderúrgico, consultados por Paula (2014) por meio de entrevistas, apontaram que a siderurgia brasileira apresenta um desempenho ambiental e energético superior à média mundial, mas aquém do Japão, Coreia do Sul e Europa.

Tabela 1: Comparação de indicadores da siderurgia brasileira

	EMISSIONES ESPECÍFICAS DE CO ₂ (tCO ₂ eq/t de aço bruto)		CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA (GJ/t de aço bruto)		EFICIÊNCIA NO USO DE MATERIAIS (% material convertido em produtos, coprodutos e subprodutos)	
	MUNDO (World Steel Association – WSA)	BRASIL (Instituto Aço Brasil)	MUNDO (World Steel Association – WSA)	BRASIL (Instituto Aço Brasil)	MUNDO (World Steel Association – WSA)	BRASIL (Instituto Aço Brasil)
2009	1,8	1,59	20,1	18,2	97,9	98,5
2010	1,8	1,7	20,7	18,7	97,7	98,1
2011	1,7	1,7	19,6	19,4	94,4	98,1
2012	1,7	1,7	19,6	n/d	96,4	n/d

Fonte: Carvalho *et al.* (2015).

Iniciativas para mitigação das emissões de gases de efeito estufa na siderurgia

São quatro as principais alternativas que têm sido usadas pelas empresas brasileiras para reduzir as emissões de GEE na siderurgia: a cogeração de energia elétrica por

meio do reaproveitamento de calor e de gases do processo; a substituição de insumos/combustíveis; a otimização do controle de processos com automação; e os programas de sensibilização/treinamento de fornecedores (CARVALHO *et al.*, 2015).

No mundo, reduções significativas nas emissões de carbono somente são esperadas a partir da disseminação de novas tecnologias. Entre as inovações destacam-se aquelas voltadas para reduzir o consumo de energia e gerar menores emissões na etapa de redução, ou seja, de processos alternativos ao alto-forno: a redução sólida; a autorredução; e a fusão redutora (CARVALHO *et al.*, 2015).

Há vários projetos nessa linha, alguns em estágio de demonstração, outros já operando em escala comercial. No Brasil, foi desenvolvida a tecnologia Tecnored, cuja planta piloto está em funcionamento. Esses projetos apresentam elevada heterogeneidade no que diz respeito ao tipo de equipamento, estágio de desenvolvimento comercial, tamanho das plantas e desempenho energético e ambiental (PAULA, 2012).² Além dos riscos usualmente associados à adoção de uma nova tecnologia, a difusão de inovações na siderurgia é lenta, uma vez que o tempo de operação dos altos-fornos, na rota integrada, é bastante longo, compatível com o elevado valor do investimento necessário para sua instalação. Considerando que predomina na siderurgia brasileira a produção por meio de altos-fornos a coque, a difusão das inovações na etapa de redução deve ser vagarosa e com baixo impacto no curto e médio prazos.

Assim como ocorre em outros setores maduros, a maioria das inovações de processos são incorporadas nas máquinas e equipamentos e realizadas prioritariamente por empresas de engenharia e produtoras de equipamentos (PAULA, 2012). Com o objetivo de desenvolver novas tecnologias para reduzir, de forma significativa, as emissões de gás carbônico, têm surgido na indústria siderúrgica iniciativas com a participação de várias instituições e financiamento público.

Destacam-se duas iniciativas para desenvolvimento de tecnologias que visam minimizar as emissões de CO₂ no processo siderúrgico: a europeia Ultra-Low CO₂ Steelmaking (ULCOS) e a japonesa CO₂ Ultimate Reduction in Steelmaking process by innovative technology for cool Earth 50 (COURSE 50).

O projeto europeu, denominado ULCOS, reúne empresas responsáveis por cerca de 90% da produção regional, universidades, centros de pesquisa e fornecedores, totalizando 48 organizações, sob a coordenação da Arcelor Mittal, com objetivo de desenvolver tecnologias para reduzir significativamente a emissão de gases de efeito estufa na siderurgia (ULCOS, [201-?]).

² Paula (2012) apresenta um quadro comparativo desses diversos processos.

Entre os subprojetos no âmbito do ULCOS, destaca-se o Hlsarna, que é uma tecnologia de redução ainda em desenvolvimento, com uma planta-piloto em funcionamento na Holanda. A tecnologia Hlsarna isoladamente reduziria as emissões de carbono em 20%, mas esse valor pode chegar a 80% quando ela é combinada com tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCS). Outra vantagem dessa tecnologia seria a sua flexibilidade, pois é possível utilizar como combustível carvão mineral, biomassa, gás natural ou mesmo hidrogênio. Esse projeto é financiado pelos participantes do consórcio (60%) e pela União Europeia (40%).

Outra tecnologia em desenvolvimento a partir do projeto ULCOS é o processo eletrolítico de produção de ferro. O uso da eletrólise para produção de ferro pode ser atrativo para a redução de emissões de gases de efeito estufa quando a energia elétrica utilizada no processo for proveniente de fontes alternativas ou de hidroeletricidade. Essas tecnologias ainda devem levar décadas para se tornarem viáveis em escala industrial e para serem difundidas.

A iniciativa japonesa COURSE 50 é coordenada pela The Japan Iron and Steel Federation e conta com a participação das maiores siderúrgicas japonesas (Nippon Steel, JFE Steel, Sumitomo Metal, Kobe Steel e Nisshi). A intenção é desenvolver até 2030 diversas tecnologias que reduzam em 30% as emissões de carbono e que estejam disponíveis para utilização em escala industrial em 2050. Os recursos para pesquisa, que totalizam mais de US\$ 300 milhões nas duas primeiras fases (2008-2012) e (2013-2017), foram integralmente aportados pelo governo japonês (JISF, [2011?]).

Além do apoio ao desenvolvimento de novas tecnologias, o principal mecanismo europeu para limitar as emissões de GEE é o *European Union Emissions Trading System* (EU ETS), maior mercado de emissões mundial. Esse mercado funciona com o mecanismo de *cap and trade*, ou seja, é estabelecido um limite anual de emissões por empresa, que recebem ou compram permissões de emissão. Essas permissões podem ser negociadas a fim de garantir que as emissões realizadas estejam cobertas. Esse mecanismo garante que o teto de emissões não seja ultrapassado, além de incentivar a adoção de medidas para mitigá-las.

O Quadro 1 a seguir apresenta de forma bastante resumida as principais oportunidades para a mitigação de emissões de GEE na siderurgia brasileira, considerando as tecnologias disponíveis. A apresentação detalhada dessas oportunidades está disponível em Carvalho *et al.* (2015).

Conforme já mencionado, identifica-se uma oportunidade de mitigação das emissões de carbono na indústria siderúrgica brasileira com a ampliação da produção de aço que utilize carvão vegetal (biomassa) como redutor, obtido a partir de florestas plantadas (BRASIL, 2010). Em usinas integradas a carvão vegetal de florestas planta-

das, a emissão de CO₂ equivale a 10% do valor observado para uma usina integrada a coque (PAULA, 2012). Em 2013, segundo as informações do Instituto Aço Brasil, 10% da produção brasileira de aço foi realizada com uso de carvão vegetal como redutor, sendo que 88,7% do carvão vegetal utilizado na produção de aço foi proveniente de florestas plantadas próprias, 7,7% de florestas plantadas de terceiros e 3,6% de resíduos florestais legalizados³ (INSTITUTO AÇO BRASIL, 2014).

Quadro 1: Medidas para redução de emissões de gases de efeito estufa na siderurgia

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO EMISSÕES	BARREIRAS	INVESTIMENTO NECESSÁRIO	VIABILIDADE
Eficiência energética no processo de sinterização – uso de tecnologia de <i>heat recovery</i>	Alto	Investimentos necessários são relativamente elevados.	Médio	Alta
Eficiência energética no processo de sinterização – melhorias incrementais variadas	Médio	São diversas as melhorias que, se adotadas em conjunto, têm um potencial de redução de emissão médio.	Baixo	Alta
Eficiência energética no processo de coqueificação – uso de sistemas para controle de mistura de carvão	Médio	Uso de sistemas, embora tenha impacto médio sobre a redução de emissões, apresenta impacto elevado sobre o consumo de coque, o que torna a sua viabilidade alta.	Alto	Alta
Eficiência energética no processo de coqueificação – apagamento a seco e outras	Médio	Diversas tecnologias incluídas nessa ação têm potenciais diversos no que diz respeito à redução de emissões.	Alto	Baixa
Eficiência no alto-forno – aumento de injeção de <i>pulverized coal injection</i> (PCI) e de gás natural	Alto	Essas duas tecnologias permitem uma economia de energia significativa, com impacto sobre a redução de emissões e médio custo de capital.	Médio	Alta
Cogeração a partir do gás de alto-forno	Médio	Essa tecnologia somente é viável para novos investimentos.	Alto	Baixa
Melhorias dos sistemas de automação e controle do alto-forno	Médio	Custo relativamente baixo do investimento, associado à redução do consumo de energia, torna alta a viabilidade desses investimentos. A maior barreira identificada é a necessidade de qualificação da mão de obra.	Baixo	Alta
Tecnologias mais eficientes para recuperação de gás de aciaria	Alto	Investimento relativamente elevado, com retorno a médio prazo.	Alto	Média

³ Todas as empresas associadas ao Instituto Aço Brasil aderiram ao Protocolo de Sustentabilidade do Carvão Vegetal, lançado em 2012. Entre os compromissos do protocolo está a previsão de que 100% da demanda de carvão vegetal seja suprida por florestas plantadas (próprias ou de terceiros) em 2016. Esse protocolo não teve adesão de produtores independentes de ferro-gusa (“guseiros”).

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO EMISSÕES	BARREIRAS	INVESTIMENTO NECESSÁRIO	VIABILIDADE
Melhorias na rota de usinas semi-integradas	Médio/alto	Destacam-se a introdução de processos de automação e controle, uso de queimadores <i>oxy-fuel</i> e o preaquecimento da sucata.	Médio	Média/alta
Lingotamento tipo <i>near shape</i>	Muito alto	Apesar do volume de investimentos necessário ser elevado, o aumento da eficiência torna a adoção dessas tecnologias interessante.	Alto	Alta
Uso de queimadores mais eficientes – lingotamento e laminação	Alto	Impactos positivos sobre redução do consumo de energia e redução de emissões combinados a investimento reduzido tornam a adoção dessa tecnologia muito atrativa.	Baixo	Alta
Sistemas de monitoramento e controle dos laminadores	Médio	Assim como em outras etapas, o uso de sistemas de monitoramento e controle tem impacto positivo sobre a eficiência energética, e o investimento necessário é baixo.	Baixo	Alta
Forno arco elétrico (EAF) a corrente contínua (DC)	Alto	Uso de corrente contínua ao invés de corrente alternada de modo a reduzir em 5% o consumo de energia elétrica. O custo de tal adaptação é alto.	Médio	Média
Melhorias dos sistemas de automação e controle no forno arco elétrico (EAF)	Alto	Custo relativamente baixo do investimento, associado à redução do consumo de energia, torna alta a viabilidade desses investimentos. Maior barreira identificada é a necessidade de qualificação da mão de obra.	Baixo	Alta

Fonte: Carvalho *et al.* (2015).

A possibilidade de expansão do uso do carvão vegetal, contudo, é limitada, pois não é viável substituir o coque utilizado em altos-fornos por carvão vegetal, e as usinas integradas a coque são, atualmente, a rota mais eficiente e predominante na produção de aço.

O carvão vegetal no Brasil é utilizado por algumas empresas integradas para a produção de aço, mas principalmente pelo segmento produtor de ferro-gusa, denominado “guseiro”. É importante destacar que a produção de gusa com carvão vegetal é uma atividade tipicamente brasileira. Além das unidades instaladas no Brasil, há apenas duas no mundo: uma na Argentina e outra no Paraguai. A Argentina paralisou os altos-fornos em 2001 e a unidade paraguaia foi adquirida pela empresa Vetorial, um dos maiores produtores de gusa brasileiros, e está em operação (PAULA, 2014).

O uso de carvão vegetal pelo segmento guseiro, contudo, apresenta problemas. Entre os problemas pode-se apontar a utilização, por parte dos produtores, de madeira nativa para a produção do carvão vegetal e a baixa eficiência dos fornos dedicados

a sua produção. A utilização de florestas plantadas é facilitada pela disponibilidade de terras e a existência de tecnologia para seu desenvolvimento, mas exige investimentos elevados, realizados com antecedência mínima de seis anos (PAULA, 2014).

Para esse segmento, a prioridade seria realizar investimentos em florestas plantadas e na difusão de fornos mais eficientes para produção do carvão vegetal (BRASIL, 2010), além de outros investimentos que procurassem dotar essa atividade de maior eficiência.⁴

Quadro 2: Medidas para redução das emissões de gases de efeito estufa para produtores independentes de ferro-gusa

AÇÃO DE REDUÇÃO	POTENCIAL DE REDUÇÃO	BARREIRAS	INVESTIMENTO NECESSÁRIO
Carvão vegetal – florestas plantadas	Alto	Investimento necessário para plantio de florestas e tempo necessário para maturação do investimento são elevados.	Alto
Carvão vegetal – fornos mais eficientes	Alto	Investimento necessário é mais elevado, mas fornos mais eficientes são utilizados por parte dos produtores.	Médio
Tecnologias mais eficientes para segmento guseiro (por exemplo, cogeração e PCI)	Médio	Custos são elevados considerando-se condições de mercado atuais para o segmento, embora essas tecnologias já sejam utilizadas por alguns produtores.	Médio

Fonte: Paula (2014).

O setor de gusa enfrenta uma conjuntura desfavorável, apresentando elevada capacidade ociosa e sem perspectivas de recuperação da produção (PAULA, 2014). Ao contrário do observado para um alto-forno a coque, o custo de paralisar o alto-forno a carvão vegetal é relativamente baixo, assim como o custo de retomar a produção, e não há risco de defasagem tecnológica (PAULA, 2014). Trata-se, dessa forma, de uma atividade com pouca intensidade tecnológica, baixa intensidade de capital e reduzidas barreiras à entrada e à saída (PAULA, 2014).

Perspectivas para as emissões na produção siderúrgica

O crescimento da produção de aço utilizando-se carvão vegetal proveniente de florestas plantadas pode ser uma oportunidade para redução da intensidade carbônica do setor. No longo prazo, a difusão de novas tecnologias permitirá a mitigação das emissões de GEE pela siderurgia. A tendência é que a difusão dessas tecnologias

⁴ Paula (2014) aponta três tecnologias cuja adoção pelos produtores de ferro-gusa traria um aumento da produtividade e da eficiência dessa atividade: a instalação de centrais termoeletricas visando ao aproveitamento de gases dos fornos para a cogeração de energia; a utilização da tecnologia de injeção de carvão pulverizado (PCI); e a sinterização. Quanto à instalação de centrais termoeletricas e à injeção de carvão pulverizado, a avaliação é de que os produtores de gusa irão, paulatinamente, adotá-las. No que se refere à sinterização, há dúvidas sobre os reais ganhos que oferece. Para a redução das emissões, a utilização de fornos mais eficientes na produção de carvão vegetal e de madeira com origem em florestas plantadas são as medidas com impactos mais significativos.

seja lenta e ocorra à medida que o mercado se expanda e novas usinas sejam instaladas. A manutenção da trajetória de redução gradual da intensidade carbônica desse segmento poderá não ser suficiente para compensar o crescimento decorrente do uso mais intensivo de aço na economia, o que pode levar a um aumento das emissões desse setor em níveis absolutos.

Referências

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil*. Brasília, 2014.

_____. Ministério do Meio Ambiente. *Plano setorial de redução de emissões da siderurgia*: sumário executivo. Brasília, 2010.

CARVALHO, P. S. L. et al. Sustentabilidade da siderurgia brasileira: eficiência energética, emissões e competitividade. *BNDES Setorial*, n. 41, Rio de Janeiro, p. 181-236, mar. 2015.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. *Siderurgia no Brasil 2010-2025*. Brasília, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. *Balanço energético nacional 2015*: ano base 2014. Rio de Janeiro, 2015.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Relatório de sustentabilidade*. Rio de Janeiro, 2014.

PAULA, G. M. de. *Economia de baixo carbono*: avaliação de impactos de restrições e perspectivas tecnológicas: produção independente de ferro-gusa (“guseiros”): relatório final. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2014.

_____. *Economia de baixo carbono*: avaliação de impactos de restrições e perspectivas Tecnológicas: siderurgia: relatório final. Ribeirão Preto: Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2012.

THE JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION – JISF. COURSE 50. *Outline of COURSE 50*. Tokyo, [2011?]. Disponível em: <http://www.jisf.or.jp/course50/outline/index_en.html>. Acesso em: 20 nov. 2015.

ULCOS. *About ULCOS*. [S.l.], [201-?]. Disponível em: <http://www.ulcos.org/en/about_ulcos/home.php>. Acesso em: 20 nov. 2015.